

SIMULATIVE UNTERSUCHUNGEN DES EINFLUSSES DER STRAHLUNGSASYMMETRIE AUF DIE THERMISCHE BEHAGLICHKEIT

Tobias Blum, Birke Schröter, Svenja Carrigan, Oliver Kornadt
RPTU Kaiserslautern-Landau, Deutschland, E-Mail: birke.schroeter@rptu.de

Kurzfassung

Gesundheit und Wohlbefinden sind essenzielle Aspekte einer nachhaltigen Gebäudeplanung [Blum, 2023]. Daraus lässt sich insbesondere die Wichtigkeit der thermischen Behaglichkeit für die Gebäudenutzer*innen ableiten. In diesem Beitrag werden mithilfe von simulativen Untersuchungen im thermischen Gebäudesimulationsprogramm TRNSYS [TRNSYS], im CFD-Simulationsprogramm Ansys [Ansys] sowie im thermischen Simulationsprogramm TAITherm [TAITherm] unterschiedliche Strahlungsasymmetrien und ihre Einflüsse auf die thermische Behaglichkeit im Rahmen des PMV-Modells und des UCB Thermal Comfort Modells untersucht. Zusätzlich im Fokus liegt dabei ein Vergleich der Modelle sowie die operative Temperatur zur Eignung als Behaglichkeitsindikator. Im weiteren Projektverlauf werden die vorläufigen Ergebnisse mithilfe von experimentellen Untersuchungen validiert.

Abstract

Health and comfort are essential aspects of a sustainable planning process in the building industry [Blum, 2023], which leads in particular to the importance of thermal comfort for users in the built environments. In this paper, the effects of various radiation asymmetries on thermal comfort are investigated using three different simulation programmes: the thermal building simulation software TRNSYS [TRNSYS], the CFD simulation software Ansys [Ansys] and the thermal simulation software TAITherm [TAITherm]. These analyses are based on Fanger's PMV model, the UCB thermal comfort model and the operative temperature as indicator for thermal comfort. The efficiency of the three concepts is compared, focussing on the ability to accurately determine thermal comfort.

Einleitung

Durch den voranschreitenden Klimawandel steht bei der Nutzung von Gebäuden meist die Einsparung von Energie und Treibhausgasen im Fokus [Schöndube et al., 2022; Krohn et al., 2020; Kornadt et al., 2021; Schröter et al., 2023]. Da die Menschen mit einem Anteil von durchschnittlich etwa 90% den Großteil

ihrer Zeit in diesen Gebäuden verbringen [Hofmann et al., 2020], muss darüber hinaus das Wohlbefinden für die Gebäudenutzenden gewährleistet werden. Folglich ist die thermische Behaglichkeit ein wichtiger Bestandteil einer nachhaltigen Gebäudeplanung, insbesondere durch ihre Einflüsse auf den Energieverbrauch und die Gesundheit der Menschen [Zheng et al., 2022]. Dabei haben sich unterschiedliche Ansätze und Modelle zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit etabliert, die jeweils eigene Vor- und Nachteile mit sich bringen [Rupp et al., 2015; Fanger, 1970; Zhang et al., 2010c] und für verschiedene Randbedingungen mehr oder weniger gut geeignet sind. So sind etwa bei Flächentemperiersystemen besondere Randbedingungen hinsichtlich der Strahlungsasymmetrie im Raum zu berücksichtigen.

In diesem Beitrag werden simulative Untersuchungen des Einflusses der Strahlungsasymmetrie auf die thermische Behaglichkeit vorgestellt. Durch die Verwendung von drei unterschiedlichen Simulationsprogrammen mit je eigenem Untersuchungsschwerpunkt wurde eine möglichst umfassende Analyse auf Simulationsbasis gewährleistet. Zunächst werden die Grundlagen der verwendeten Behaglichkeitsmodelle kurz dargelegt. Dabei liegt der Fokus auf dem Fanger'schen PMV-Modell, dem UCB Thermal Comfort Modell sowie der operativen Temperatur als Behaglichkeitsindikator. Anschließend wird die Methodik anhand der verwendeten Simulationsprogramme, dem thermischen Gebäudesimulationsprogramm TRNSYS, dem CFD-Simulationsprogramm Ansys sowie dem thermischen Simulationsprogramm TAITherm, vorgestellt. Die Untersuchungen erfolgten zunächst ausschließlich durch Simulationen, werden zukünftig jedoch durch experimentelle Untersuchungen in einer Klimakammer validiert und erweitert. Durchgeführt werden Studien sowohl mit einem thermischen Manikin als auch mit Proband*innen.

Modelle der thermischen Behaglichkeit

Das 1970 von Fanger entwickelte Modell zur Bewertung der thermischen Behaglichkeit [Fanger, 1970] basiert auf einer Wärmebilanz des menschlichen Körpers. Nach Fanger ist die thermische

Behaglichkeit mit einem thermisch neutralen Zustand gleichzusetzen. Dieser stelle sich für die Raumnutzenden dann ein, wenn sie weder ein wärmeres noch ein kühleres Umgebungsklima bevorzugen würden. Mit Blick auf die Wärmebilanz bedeutet dies, dass der Körper genau so viel Wärme erzeugt, wie er auch wieder an die Umgebung abgibt. Auf dieser Prämisse aufbauend, wurden die Proband*innen in den durchgeführten experimentellen Untersuchungen nach ihrem thermischen Befinden befragt und sollten angeben, ob sie das Innenraumklima in diesem Moment als heiß (+3), warm (+2), etwas warm (+1), neutral (0), etwas kühl (-1), kühl (-2) oder kalt (-3) empfanden. Ergebnis war das PMV-Modell, mit dem die Behaglichkeit im Raum anhand der siebenstufigen Skala vorhergesagt werden kann und welches die Grundlage für die DIN EN ISO 7730 [DIN EN ISO 7730] bildet.

Während im Behaglichkeitsmodell nach Fanger lediglich der gesamte Körper und damit die globale thermische Behaglichkeit im Fokus steht, wurde im Behaglichkeitsmodell der University of California Berkeley UCB der Körper in 19 unterschiedliche Segmente unterteilt und dadurch berücksichtigt, dass auch die lokale thermische Behaglichkeit einen wesentlichen Einfluss auf das Wohlbefinden der Raumnutzenden hat [Zhang et al., 2010c, 2010a, 2010b; Zhao et al., 2014]. Die Wahrnehmung der jeweiligen Körpersegmente wird im Modell über eine logistische Funktion mithilfe der Eingabeparameter der lokalen und mittleren Hauttemperatur sowie der Ableitungen der Haut- und der Körperkerntemperatur jeweils über die Zeit vorhergesagt. Der globale thermische Zustand des Körpers wird dabei über die mittlere Hauttemperatur berücksichtigt und die beiden Ableitungen über die Zeit ermöglichen die Analyse instationärer Raumklimata. Ferner wurde die siebenstufige Skala des Modells nach Fanger um die beiden Extrema very cold (-4) und very hot (+4) ergänzt. Zu unterscheiden sind dabei das thermische Empfinden und die thermische Behaglichkeit. Während sich die Skala des thermischen Empfindens, wie aufgezeigt, an der Skala des Fanger'schen Modells orientiert, leitet sich die Skala der thermischen Behaglichkeit aus der Empfindung ab, sodass eine genauere Betrachtung dieses Zusammenhangs erforderlich ist.

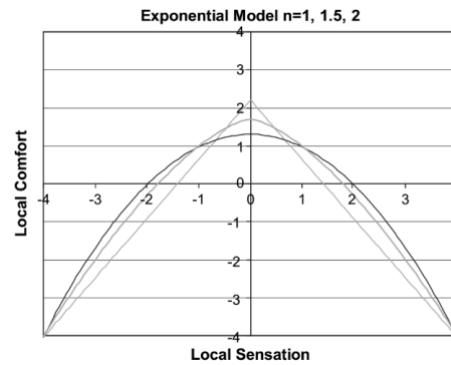


Abbildung 1: Drei mögliche Graphen für den Zusammenhang der lokalen thermischen Empfindung und der lokalen thermischen Behaglichkeit [Zhang et al., 2010a]

Auch das UCB-Modell folgt dem Ansatz von Fanger, nachdem der neutrale Zustand mit einer höheren Behaglichkeit einhergeht. Dies ist in Abbildung 1 an jedem der drei möglichen Graphen für den Zusammenhang der lokalen thermischen Empfindung und der lokalen thermischen Behaglichkeit zu erkennen. Analog zum PMV-Modell liegt der Bereich der größten Zufriedenheit mit dem Umgebungsklima bei einer lokalen Empfindung zwischen etwas warm (+1) und etwas kühl (-1). Dabei wird die Skala der thermischen Behaglichkeit unterteilt in sehr behaglich (+4), behaglich (+2), gerade noch behaglich (+1), gerade so unbehaglich (-1), unbehaglich (-2) und sehr unbehaglich (-4). Es ist zu sehen, dass dabei keine Unterteilung in warme und kühle Zustände vorgenommen wird, entscheidend ist lediglich das Ergebnis mit Bezug auf die Behaglichkeit. Mit dem UCB-Modell können homogene und heterogene sowie stationäre und instationäre Raumklimata analysiert werden.

Beide Modelle wurden in der Vergangenheit hinsichtlich ihrer Funktionalität und Präzision bei der Vorhersage der thermischen Behaglichkeit untersucht und analysiert. In [Völker, 2012] kam Völker zu dem Ergebnis, dass das UCB-Modell bei der Simulation der Körperkern- und der Hauttemperatur in instationären Bedingungen zu guten Ergebnissen führte. Auch bei stationären Bedingungen erwies sich das Modell als verlässlich und genau. Schellen et al. [Schellen et al., 2013] verglich das UCB-Modell mit dem PMV-Modell nach Fanger. Letzteres sei grundsätzlich gut, habe jedoch Schwierigkeiten in heterogenen Raumklimata und sei problematisch bei vielen unterschiedlichen Körperarten, Ethnien und Geschlechtern. Dagegen sei das UCB-Modell auch bei heterogenen Raumklimata vielversprechend [Schellen et al., 2013], sodass sich das Modell besonders für die Untersuchung von Strahlungsasymmetrien eignet, die von ihrer Natur her heterogen sind.

Als ein zusätzlicher Behaglichkeitsindikator dient häufig außerdem die operative Temperatur, welche sich bei niedrigen Luftgeschwindigkeiten vereinfacht

als arithmetisches Mittel aus der Raumluft- und der mittleren Strahlungstemperatur beschreiben lässt [DIN EN 13779]. Diese wird nicht selten als „empfundene Temperatur“ [Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, 2015] bezeichnet und gilt auch in der DIN EN 16798-1 [DIN EN 16798-1] als Kenngröße der thermischen Behaglichkeit in Abhängigkeit von den herrschenden Außentemperaturen.

Simulationen in Ansys

Ziel der Untersuchungen in Ansys [Ansys] war es, zusätzlich zu den Kennwerten der thermischen Behaglichkeit – die operative Temperatur und den PMV-Index – auch die durch die unterschiedlichen Oberflächentemperaturen entstehenden Luftströmungen zu analysieren und die physikalischen Randbedingungen im Raum zu berücksichtigen. Dazu wurde die Zwei-Zonen-Klimakammer des Fachgebietes modelliert (Abbildung 2) und unterschiedliche Strahlungsasymmetrieszenarien simuliert.

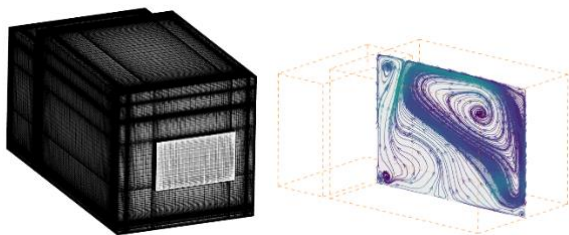


Abbildung 2: Modell der Klimakammer in Ansys (links) mit Schnitt der betrachteten Ebene (rechts)

Der Raum des Innenklimas hat eine Grundfläche von 3 m x 4,2 m und ist 3 m hoch. Auf der rechten Seite der Abbildung 2 ist die betrachtete Schnittebene zu erkennen. Luftströmungen und Lufttemperatur wurden in den Modellen simulativ ermittelt, die Oberflächentemperaturen der Wände, der Decke und des Bodens wurden in Abhängigkeit des betrachteten Szenarios vorgegeben. Um möglichst hohe Effekte zu generieren, wurde zunächst die maximal zulässige Temperatur einer Fußbodenheizung [DIN EN 1264-2] von 29 °C als Referenz für die Oberflächentemperaturen gewählt, die restlichen Oberflächen wurden auf 20 °C eingestellt. In Abbildung 3 ist das Strömungsprofil für eine Fußbodenheizung beispielhaft dargestellt.

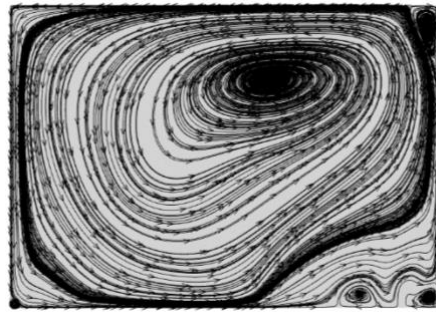


Abbildung 3: Luftströmungsprofil der betrachteten Ebene bei einer Fußbodenheizung mit 29 °C Oberflächentemperatur

Darin ist zu erkennen, wie die warme Luft an einer Wand vorbei nach oben steigt und an der Decke abkühlt, ehe sie auf der anderen Seite des Raums an der Wand entlang wieder nach unten sinkt. Dagegen stellt sich in derselben Schnittebene bei einer Deckenheizung ein wesentlich heterogeneres Strömungsprofil ein, wie an den vielen Verwirbelungen unmittelbar unter der warmen Deckenoberfläche in Abbildung 4 zu sehen ist. Hier ist jedoch zu betonen, dass die aufgezeigten Bilder nicht repräsentativ für alle Fußboden- und Deckenheizungen sind, da aufgrund der Komplexität des betrachteten Systems und entstehender Turbulenzen dieses meist instabil ist. Ferner waren auch große Abweichungen bei den Strömungsprofilen anderer Ebenen zu erkennen.

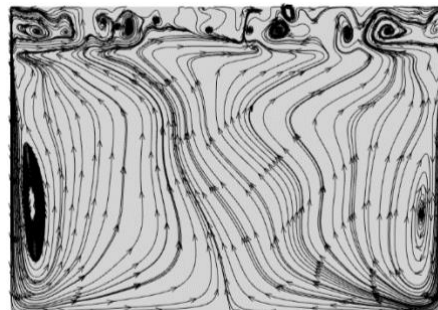


Abbildung 4: Luftströmungsprofil der betrachteten Ebene bei einer Deckenheizung mit 29 °C Oberflächentemperatur

Interessanter als dieser qualitative Blick ist jedoch die Analyse der sich einstellenden Luftgeschwindigkeiten unter Berücksichtigung aller untersuchten Szenarien. In allen Simulationen lag die maximale Luftgeschwindigkeit unter 0,1 m/s, auch in Szenarien, in denen die beheizte Wand 29 °C und die gegenüberliegende Wand nur 15,5 °C warm waren. Ohne Belüftung stellen sich also in einem Raum mit Wandheizung trotz hoher Temperaturdifferenzen von 14 K zwischen verschiedenen Wänden als auch in Räumen mit Deckenheizung nur geringe Luftgeschwindigkeiten ein. Die Werte des Szenarios einer Fußbodenheizung waren mit etwa 0,22 m/s wesentlich höher als bei den anderen Szenarien,

sodass bei Fußbodenheizungen Zuglufterscheinungen und der Transport von Staubpartikeln über die Konvektionsströmungen eine vergleichbar größere Rolle spielen. Die in Ansys simulierten Luftgeschwindigkeiten wurden anschließend für die Simulationen in TRNSYS verwendet und darin im Rahmen der Analyse der thermischen Behaglichkeit nach DIN EN ISO 7730 im Modell hinterlegt.

Simulationen in TRNSYS

Auch in TRNSYS [TRNSYS] wurde zunächst die Klimakammer und anschließend ein Beispielraum mit gleicher Geometrie bei unterschiedlichen Fensterflächen modelliert (Abbildung 5).

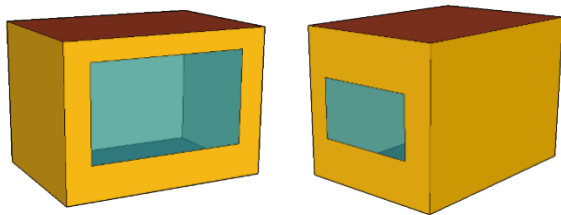


Abbildung 5: TRNSYS Modelle eines Beispielraums (links) und der Klimakammer (rechts)

Erste Untersuchungen konzentrierten sich auf den Vergleich mit den Simulationen in Ansys und speziell auf den Einfluss der Entfernung zur temperierten Fläche. Wie zu erwarten und anhand der Abbildung 6 zu erkennen ist, ist der Einfluss einer beheizten Oberfläche auf die thermische Behaglichkeit höher, je näher sich der Messpunkt an dieser Fläche befindet.

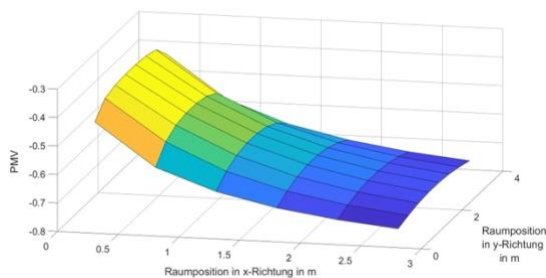


Abbildung 6: PMV in Abhängigkeit von der Lage im Raum und Distanz zur beheizten Wand (yz-Ebene) bei einer Höhe von 1,75 m

In der Abbildung bildet jede Nullebene des Koordinatensystems eine Wand der Klimakammer ab. Die yz-Ebene stellt die beheizte Wand (29 °C) dar. Es ist zu erkennen, dass die PMV-Werte direkt vor der beheizten Wand mittig am höchsten sind. Zu den Rändern hin beeinflussen die kühleren Wände die mittlere Strahlungstemperatur und reduzieren dadurch das PMV leicht. Die dargestellten Effekte der Position der Messpunkte waren für die übrigen Asymmetrieszenarien analog. Für die thermische Behaglichkeit relevante Randbedingungen entsprechend DIN EN ISO 7730 waren: Bekleidungsisolierung: $I_{cl} = 1 \text{ clo}$, Energieumsatz:

$M = 1 \text{ met}$, relative Luftgeschwindigkeit: $v_{ar} = 0,01 - 0,22 \text{ m/s}$, relative Luftfeuchte: $RH = 50\%$. Die Luftgeschwindigkeiten wurden dabei den Simulationen in Ansys entnommen und die Lufttemperatur betrug 20 °C.

Um weitere und insbesondere möglichst realistische Asymmetrieszenarien untersuchen zu können, wurden die beiden Modelle in TRNSYS zusätzlich für die Ermittlung realistischer Oberflächentemperaturen genutzt. Beide Räume aus Abbildung 5 wurden in TRNSYS in einem Außenklima aus TRY-Datensätzen [Deutscher Wetterdienst, Regionales Klimabüro Essen; Deutscher Wetterdienst, 2022] für den Standort Kaiserslautern simuliert. Bei der Klimakammer wurde neben der Wand mit Fenster zusätzlich eine lange Wand als Außenwand abgebildet und bei dem Beispielraum war lediglich die Wand mit Fenster eine Außenwand. Als Dämmstandard wurde jeweils einmal ein GEG-Standard [Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK, 2023] (U-Wert der Außenwände 0,28 W/m²K) gewählt und einmal ein Standard für übliche Gebäude bis 1968 nach [Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2015] mit einem U-Wert der Außenwände von 1,4 W/m²K. Die erforderliche operative Temperatur während der Simulationen betrug 20,4 °C und sie wurde durch die unterschiedlichen Heizsysteme gewährleistet. Auf diese Weise wurde der Einfluss des Dämmstandards auf die erforderliche Oberflächentemperatur der Heizfläche und somit auch auf die Qualität der Strahlungsasymmetrie untersucht. Die Innenwandoberflächen betragen in allen Szenarien etwa 20 °C. Bei einem geringeren Dämmstandard mussten die Heizsysteme maximal 27 – 33 °C generieren, beim GEG-Standard reichten maximale Temperaturen von 24 – 26 °C. Gleichzeitig kühlten die Außenwände beim höheren U-Wert auf etwa 16 °C herunter, während die Oberflächentemperatur beim GEG-Standard bei etwa 19,5 °C lag (Tabelle 1). Die simulierten Werte dienten anschließend als Randbedingungen für die Simulationen in TAItherm.

Tabelle 1: simulierte Oberflächentemperaturen aus TRNSYS

U-Wert Außenwand [W/m ² K]	Innenwand [°C]	Außenwand [°C]	Heizfläche [°C]
0,28	~ 20	~ 19,5	24 – 26
1,40	~ 20	~ 16,2	27 – 33

Simulationen in TAItherm

Mithilfe des thermischen Simulationsprogramms TAItherm [TAItherm] war es möglich, die Strahlungsasymmetrien der in TRNSYS bestimmten Szenarien im Rahmen des UCB Thermal Comfort Modells zu untersuchen. Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, können darin menschliche Körper modelliert und analysiert werden.

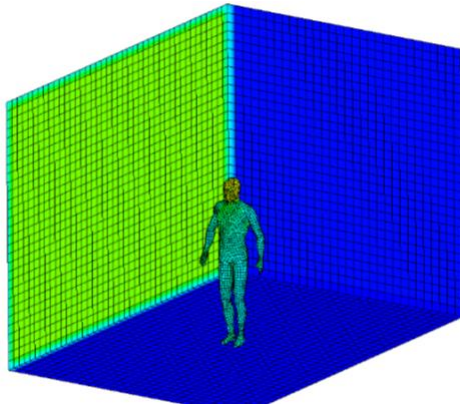


Abbildung 7: TAItherm Modell der Klimakammer

Die Geometrie des Raumes im Modell entspricht den oben vorgestellten Abmessungen der Klimakammer. Das menschliche Modell stand in den Simulationen zunächst mittig im Raum. Entsprechend des UCB-Modells werden als Ergebnis sowohl die lokalen und globalen thermischen Empfindungen (Abbildung 8) als auch die lokale und globale thermische Behaglichkeit (Abbildung 9) generiert.

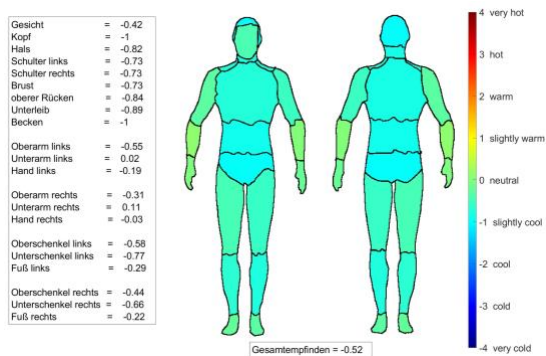


Abbildung 8: thermisches Empfinden einer Person im Raum mit Wandheizung in Blickrichtung rechts der Person und einer gegenüberliegenden Außenwand mit $U = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$

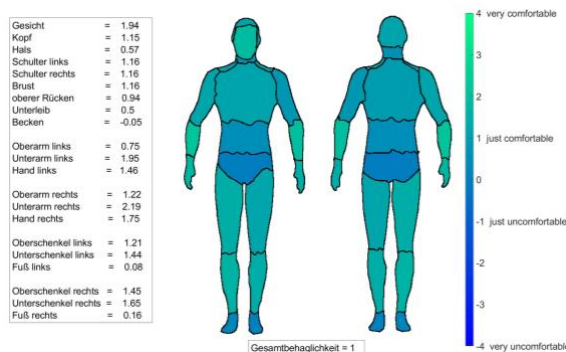


Abbildung 9: thermische Behaglichkeit einer Person im Raum mit Wandheizung in Blickrichtung rechts der Person und einer gegenüberliegenden Außenwand mit $U = 1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$

Wie auch in der DIN EN ISO 7730 gilt für das UCB-Modell, dass unzufriedene Personen solche sind, die nach der 7-stufigen Klimabeurteilungsskala entweder

mit heiß (+3), warm (+2), kühl (-2) oder kalt (-3) urteilen. Daraus ergibt sich der Zusammenhang, dass Werte für das thermische Empfinden zwischen etwas warm (+1) und etwas kühl (-1) zu Wahrnehmungen von mindestens *just comfortable* führen. Dabei sind jedoch auch der Einfluss lokaler Unbehaglichkeiten sowie die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Segmente zu berücksichtigen. Ein Vergleich der UCB Behaglichkeit mit den PMV-Werten ist schwierig, da der PMV lediglich das thermische Empfinden darstellt, das UCB-Modell jedoch die thermische Behaglichkeit beschreibt. Daher werden in Tabelle 2 zusätzlich die PMV-Werte des Fanger'schen Modells den thermischen Empfindungen des UCB-Modells gegenübergestellt.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der globalen Empfindungen durch PMV, UCB und die operative Temperatur der Simulationen des Beispielraumes

Heizfläche	U-Wert Außenwand [W/m ² K]	PMV	sensation / comfort nach UCB		T _{op} [°C]
Wand	0,28	-0,90	-0,52	1,04	20,5
	1,4	-0,91	-0,52	0,99	20,5
Decke	0,28	-0,92	-0,51	1,02	20,4
	1,4	-1,01	-0,55	0,94	20,1
Boden	0,28	-0,86	-0,52	1,13	20,7
	1,4	-0,86	-0,54	1,08	20,7

Es ist zu erkennen, dass die Empfindungen im UCB-Modell als etwas wärmer vorhergesagt werden als im Modell nach Fanger. Auch sind die Abweichungen der thermischen Empfindungen zwischen den drei Heizarten beim UCB geringer als beim PMV-Modell. Diese Abweichungen des PMV korrelieren mit der operativen Temperatur, die als arithmetisches Mittel aus der mittleren Strahlungstemperatur des Körpermodells in TAItherm und der Raumlufttemperatur ermittelt wurde. Die Unterschiede in der operativen Temperatur sind darauf zurückzuführen, dass in TAItherm das PMV-Modell am gesamten Manikin bestimmt wird und in TRNSYS lediglich an einem imaginierten Messpunkt in der Mitte des Raumes. In den TRNSYS Simulationen lagen die operativen Temperaturen bei 20,4 °C und die Oberflächentemperaturen der Szenarien entsprechen den dort simulierten Ergebnissen. Da das Manikin in TAItherm jedoch einen direkten Kontakt zum Fußboden hat und sich die Werte auf einen ganzen Körper und nicht nur auf einen Punkt beziehen, entstehen leichte Diskrepanzen zwischen den Simulationsprogrammen, welche sich wiederum auf die operative Temperatur und folglich auch auf die PMV-Werte auswirken. Durch die Berücksichtigung der lokalen Empfindungen scheint das UCB-Modell stabiler gegenüber diesen kleineren Abweichungen zu sein. Auch die operative Temperatur scheint einen größeren Einfluss im Modell nach Fanger zu haben als unter Berücksichtigung der lokalen Empfindungen. Die

Behaglichkeit nach UCB lag in allen Szenarien der Tabelle 2 in einem Bereich von $1,04 \pm 0,1$ (noch behaglich). Die höchsten Werte wurden ebenfalls bei der Fußbodenheizung erreicht, was auf die von der Richtung des Wärmestroms abhängigen Wärmeübergänge und den direkten Kontakt zwischen Boden und Füßen zurückzuführen ist. Auch wenn die Abweichungen der globalen thermischen Behaglichkeit der jeweiligen Heizsysteme vom Mittelwert etwa 10% betragen, lohnt sich hier ein Blick auf die Skala des UCB-Modells. Alle Werte liegen unmittelbar um den Bereich (+1) *just comfortable*. Wie sehr die leichten Diskrepanzen für Personen im Raum spürbar wären, bleibt fraglich. Die Ergebnisse wurden auch noch nicht validiert und sind als vorläufig anzusehen.

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden simulative Untersuchungen des Einflusses der Strahlungsasymmetrie auf die thermische Behaglichkeit vorgestellt. Die drei verwendeten Simulationsprogramme mit je eigenem Untersuchungsschwerpunkt ermöglichten eine umfassende Analyse des Forschungsschwerpunkts. Fokus der Simulationen lag auf dem Modell nach Fanger, dem UCB-Modell und der operativen Temperatur als Indikator der thermischen Behaglichkeit. In Ansys wurden zunächst Strömungsprofile bei unterschiedlichen Flächenheizungen in der Klimakammer des Fachgebiets simulativ untersucht. Durch eine solche physikalische Raumanalyse können die Einflüsse der Strahlungsasymmetrien auf verschiedene Randbedingungen der thermischen Behaglichkeit analysiert werden. Dabei wiesen die Luftbewegungen bei allen Szenarien mit Wand- oder Deckenheizungen nur geringe Geschwindigkeiten $<0,1$ m/s auf, dagegen bei der Fußbodenheizung mit $0,22$ m/s wesentlich höhere. Anschließend wurden die Klimakammer und ein Beispielraum in TRNSYS modelliert, um zum einen die thermische Behaglichkeit im Rahmen des PMV-Modells zu untersuchen und zum anderen möglichst realistische Oberflächentemperaturen in diversen Asymmetrieszenarien zu ermitteln. Die berechneten Oberflächentemperaturen dienten dann als Randbedingungen für die Simulationen in TAItherm, in denen der Untersuchungsrahmen mit dem UCB-Modell erweitert wurde. Darin waren leichte Diskrepanzen zwischen den beiden untersuchten Modellen zu erkennen, ebenso wie eine Korrelation zwischen der operativen Temperatur und der thermischen Behaglichkeit. Aufgrund noch fehlender Validierungen sind die aufgezeigten Ergebnisse jedoch noch als vorläufig anzusehen.

Danksagung

Die Autor*innen bedanken sich beim Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) für die

Förderung im Rahmen der Forschungsinitiative Zukunft Bau. Aufbauend auf den Erkenntnissen des geförderten Projektes wurden die hier gezeigten Ergebnisse erzielt.

Literatur

- Ansys: Ansys Academic Research Fluent Release 20.2.
- Blum T. 2023. Ganzheitliche Bewertung eines auf Peltier-Elementen basierenden Flächenheiz- und -kühlsystems. In: Schriftenreihe des Fachgebiets Bauphysik / Energetische Gebäudeoptimierung, Band 6. Doctoralthesis. XIII, 144.
- Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat. 2015. Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) Büro- und Verwaltungsgebäude. Soziokulturelle Qualität - Kriterium: Thermischer Komfort. Berlin.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK. 2023. Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden: Gebäudeenergiegesetz - GEG.
- Deutsche Energie-Agentur GmbH. 2015. Reihe "Leitfaden Energieausweis": Teil 1 - Energiebedarfsausweis: Datenaufnahme Wohngebäude. Berlin.
- Deutscher Wetterdienst. 2022. Klimaberatungsmodul. <https://kunden.dwd.de/obt/>.
- Deutscher Wetterdienst, Regionales Klimabüro Essen. Testreferenzjahre (TRY). <https://www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre.html>.
- DIN EN 1264-2: DIN EN 1264-2:2021 Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlssysteme mit Wasserdurchströmung - Teil 2: Fußbodenheizung: Prüfverfahren für die Bestimmung der Wärmeleistung unter Benutzung von Berechnungsmethoden und experimentellen Methoden; Deutsche Fassung EN 1264-2:2021, Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- DIN EN 13779: DIN EN 13779:2005-05, Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlssysteme; Deutsche Fassung EN 13779:2007, Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- DIN EN 16798-1: DIN EN 16798-1:2019, Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich der Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik - Modul M1-6. Deutsche Fassung EN 16798-1:2019, Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- DIN EN ISO 7730: DIN EN ISO 7730:2006-05, Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des

- PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005), Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- Fanger PO. 1970. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.
- Hofmann M, Geyer C, Kornadt O. 2020. Indoor Climate Measurements in Buildings and Design Functions for Building Simulations:42029.
- Kornadt O, Carrigan S, Hartner M, Schöndube T, Wilhelm J, Lachmann M, Lermen H, Kissinger M, Beecken C, Becker S. 2021. Analyse der Diskrepanz zwischen berechnetem Energiebedarf nach EnEV und tatsächlichem Energieverbrauch: Abschlussbericht F.
- Krohn J, Carrigan S, Friedrich T, Kornadt O, editors. 2020. Energy efficient heating and cooling ventilation system with integrated PCM heat storage units.
- Rupp RF, Vásquez NG, Lamberts R. 2015. A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and buildings* 105:178–205.
- Schellen L, Loomans M, Kingma BRM, Wit MH de, Frijns AJH, van Marken Lichtenbelt WD. 2013. The use of a thermophysiological model in the built environment to predict thermal sensation: coupling with the indoor environment and thermal sensation. *Building and Environment* 59:10–22.
- Schöndube T, Beecken C, Jülg L, Kornadt O. 2022. Treibhausgaspotenzial von Wohngebäuden unter Berücksichtigung der Herstellungs-, Nutzungs- und Instandhaltungsphase in Abhängigkeit vom energetischen Gebäudestandard. In: *Bauphysik in Forschung und Praxis - Bauphysiktag Kaiserlautern 2022*. Schriftenreihe des Fachgebiets Bauphysik/Energetische Gebäudeoptimierung, Band 5, S. 167-170, ISSN 2363-8206, ISBN 978-3-95974-176-7.
- Schröter B, Spiegel J, Carrigan S, Kornadt O, Friedrich T, Wißbach M, Platzek D, Büscher W. 2023. Energiegewinn und Energieeinspeicherung des Prototyps eines neuartigen Wärmespeicher- und Energieerzeugungssystems. *Bauphysik* 45, H. 5, S. 245–251.
- TAItherm: TAItherm 2022.2.1, 3D thermal simulation software, ThermoAnalytics, Calumet, MI USA.
- TRNSYS: TRNSYS 18: Transient System Simulation Tool, Madison, WI, USA: Thermal Energy System Specialists.
- Völker C. 2012. Entwicklung und messtechnische Validierung der Kopplung von CFD-Simulation mit einem thermophysiologicalen Modell zur Bestimmung der thermischen Behaglichkeit. Autor: Völker, C; Bauhaus-Universität Weimar, Verl. Im Jonas Verlag, ISBN 978-3-95773-051-0. Kornadt, O. (Hrsg.).
- Zhang H, Arens E, Huizenga C, Han T. 2010a. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part II: Local comfort of individual body parts. *Building and Environment* 45:389–398.
- Zhang H, Arens E, Huizenga C, Han T. 2010b. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part III: Whole-body sensation and comfort. *Building and Environment* 45:399–410.
- Zhang H, Arens E, Huizenga C, Han T. 2010c. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments: Part I: Local sensation of individual body parts. *Building and Environment* 45:380–388.
- Zhao Y, Zhang H, Arens EA, Zhao Q. 2014. Thermal sensation and comfort models for non-uniform and transient environments, part IV: adaptive neutral setpoints and smoothed whole-body sensation model. *Building and Environment* 72:300–308.
- Zheng P, Wu H, Liu Y, Ding Y, Yang L. 2022. Thermal comfort in temporary buildings: A review. *Building and Environment* 221:109262.